

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Parní generátor jaderné elektrárny s rychlým reaktorem

Steam generator of fast breeder nuclear power plant

Student:

Radim Fojtů

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Fojtů**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3907R009 Provoz energetických zařízení**
Téma: **Parní generátor jaderné elektrárny s rychlým reaktorem
Steam Generator of Fast Breeder Nuclear Power Plant**

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište koncepci a funkci parního generátoru jaderné elektrárny s rychlým reaktorem.

Proved'te návrh koncepce tepelného výměníku se zjednodušeným tepelným a hydraulickým výpočtem. Uveďte také vliv chemické reakce sodíku a oxidu uhličitého i sodíku a vody a jejich vliv na bezpečnost tepelného výměníku.

Zadané parametry:

Výkon parního generátoru 500 MWt;
chladicí medium je voda / pára;
tlak výstupní páry $p = 15 \text{ MPa}$;
teplota výstupní páry $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.

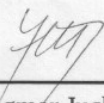
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

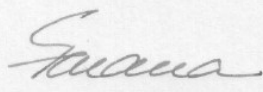
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5. 2012

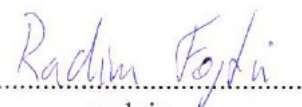
Radim Fejta

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2012


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Radim Fojtů

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dlouhá 26
Nový Jičín 741 01
Česká republika

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Fojtů, R. *Parní generátor jaderné elektrárny s rychlým reaktorem: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 361, 2012, Vedoucí práce: Kolat, P

Bakalářská práce se zabývá parními generátory elektráren IV. generace s rychlým reaktorem. V této práci jsem se zabýval variantou sodíkem chlazeného reaktoru. Uvádím druhy možných koncepčních řešení, vhodností sodíku jako chladicí médium, základním bezpečnostním systémem a používané koncepční řešení, chemické reakce Na-CO₂ a Na-H₂O. Ve výpočtové části je zjednodušeny výpočet parního generátoru, počítaného jako tepelný výměník. Výpočet parního generátoru vychází z koncepce parního generátoru pro reaktor BOR 60.

ANOTATION OF THE BACHELOR THESIS

Fojtů, R. *Steam generator of fast breeder nuclear power plant: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetic 361, 2012, Thesis head: Kolat, P.

Bachelor work deals with steam generators of plants IV. generation with fast breeder. In this work, I dealt with a variant of sodium cooled reactor. I present conceptual types, the suitability of sodium as a cooling medium, the basic security system, used conceptual solution and chemical reaction of Na-CO₂ a Na-H₂O. The calculation is simplified calculation of the steam generator, calculated as a heat exchanger. Calculation of the steam generator is based on the concept of the steam generator to the reactor BOR 60.

Obsah:

ÚVOD:	9
1. RYCHLÉ REAKTORY	10
1.1. RYCHLÝ REAKTOR MNOŽIVÝ	10
1.2. ZÁKLADNÍ DRUHY RYCHLÝCH REAKTORŮ IV. GENERACE PODLE DRUHU CHLAZENÍ	10
2. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY A PARNÍ GENERÁTORY	12
2.1. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY A PARNÍ GENERÁTORY S TEKUTÝMI KOVY	12
3. TEKUTÉ KOVY JAKO TEPLONOSIČ	13
3.1. OPTIMÁLNÍ TEPLONOSIČ	13
4. SODÍK JAKO TEPLONOSIČ	15
4.1. NEJZNÁMĚJŠÍ SLITINY SODÍKU POUŽÍVANÉ JAKO CHLADÍCÍ MÉDIUM	15
4.2. CHOVÁNÍ SODÍKU VE STYKU S OCELEMI	15
5. TYPY KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ PARNÍCH GENERÁTORŮ S TEKUTÝM SODÍKEM	17
5.1. ŘEŠENÍ PRO TĚLESOVÝ NEBO MAKROMODULOVÝ PARNÍ GENERÁTOR S PŘÍMÝMI TRUBKAMI ..	17
5.2. ŘEŠENÍ PRO TĚLESOVÝ NEBO MAKROMODULOVÝ PARNÍ GENERÁTOR S PŘÍMÝMI TRUBKAMI ..	18
5.3. ŘEŠENÍ TĚLESOVÉHO TYPU S TRUBKAMI VE TVARU U	18
5.4. ŘEŠENÍ JE TĚLESOVÉ S FIEDOVÝMI TRUBKAMI	19
5.5. ŘEŠENÍ PARNÍHO GENERÁTORU DO TVARU L	19
5.6. ŘEŠENÍ KDE JE SVAZEK TRUBEK I PLÁŠŤ VE TVARU U	20
5.7. ŘEŠENÍ VHODNÉ PRO MIKROMODULOVÉ PARNÍ GENERÁTORY	20
5.8. ŘEŠENÍ TĚLESOVÉHO PARNÍHO GENERÁTORU S PARALELNĚ ŘAZENÝMI TRUBKOVÝMI HADY ...	21
5.9. ŘEŠENÍ TĚLESOVÉHO PARNÍHO GENERÁTORU S DO ŠROUBOVICE VINUTÝMI TRUBKAMI	21
5.10. INVERZNÍ PARNÍ GENERÁTOR	22
6. CHEMICKÉ REAKCE NA-CO ₂ A NA-H ₂ O A JEJICH VLIV NA BEZPEČNOST	24
6.1. POROVNÁNÍ CHEMICKÝCH REAKCÍ DLE VÝVINU TEPLA	24
6.2. POROVNÁNÍ CHEMICKÝCH REAKCÍ DLE KINETIKY	25
7. BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM PAROGENERÁTORŮ SE SODÍKEM	26
8. PŘÍKLADY PAROGENERÁTORŮ U ELEKTRÁREN CHLAZENÝMI SODÍKEM	28
8.1. PAROGENERÁTOR ELEKTRÁRNY ENRICO FERMI 1 (USA)	28

8.2.	PAROGENERÁTOR ELEKTRÁRNY PHENIX (FRA)	29
8.3.	PAROGENERÁTOR ELEKTRÁRNY BOR 60.....	29
8.4.	PAROGENERÁTOR “NAĎA”	31
8.5.	INVERZNÍ PRŮTOČNÝ MODULOVÝ PAROGENERÁTOR U REAKTORU BOR 60.....	31
8.6.	PAROGENERÁTOR PGN-200M JADERNÉ ELEKTRÁRNY BN 600.....	33
8.7.	PAROGENERÁTOR PGN-272 JADERNÉ ELEKTRÁRNY BN 800	35
9.	VÝPOČET:	37
9.1.	BILANCE HMOTNOSTNÍCH TOKŮ	38
9.2.	TEPELNÝ TOK NA STRANĚ PÁRY	38
9.3.	TEPELNÝ TOK NA STRANĚ SODÍKU.....	39
9.4.	VÝPOČET SOUČinitele PŘESTUPU TEPLA – SODÍK.....	40
9.5.	VÝPOČET SOUČinitele PŘESTUPU TEPLA – PARNÍ STRANA.....	46
10.	VÝPOČET DÉLKY ČLÁNKU	52
10.1.	EKONOMIZÉR	52
10.2.	VÝPARNÍK.....	53
10.3.	PŘEHŘÍVÁK	53
	ZÁVĚR:.....	54

Seznam použitých značek a symbolů

Nu_{Na}^{91}	[-]	Nusseltovo číslo v sodíkovém článku
$Nu_{H_2O}^{91}$	[-]	Nusseltovo číslo v parním článku
Pe_{Na}^{91}	[-]	Pecletovo číslo v sodíkovém článku
$Pe_{H_2O}^{91}$	[-]	Pecletovo číslo v parním článku
$Pr_{Na}^{stř}$	[-]	Prandtlovo číslo pro střední teplotu sodíku
$Pr_{páry}^{stř}$	[-]	Prandtlovo číslo pro střední teplotu páry
\dot{Q}	[W]	Tepelný výkon
Q_{PI}	[kJ / s]	Tepelný tok v přehříváku
Q_{VYP}	[kJ / s]	Tepelný tok v přehříváku
Q_{EKO}	[kJ / s]	Tepelný tok v ekonomizéru
Re_{Na}^{91}	[-]	Reynoldsovo číslo v sodíkovém článku
$Re_{H_2O}^{91}$	[-]	Reynoldsovo číslo v parním článku
S_{Na}^{91}	[m ²]	Plocha pro průtok sodíku
$S_{H_2O}^{91}$	[m ²]	Plocha pro průtok páry
T_{EKO}	[°C]	Teplota za ekonomizérem
$\overline{\Delta T_{ln}}$	[°C, K]	Střední logaritmický spád
p	[MPa]	Tlak vstupní páry
t_p	[°C]	Teplota vstupní páry
t_{nv}	[°C]	Teplota napájející vody
t_{vst}	[°C]	Teplota sodíku na vstupu
$t_{výst}$	[°C]	Teplota sodíku na výstupu
p_{VYP}	[MPa]	Tlak sytosti páry
t_{VYP}	[°C]	Teplota ve výparníku
i_{vys}	[kJ/kg]	Entalpie výstupní páry
i_{nv}	[kJ/kg]	Entalpie napájecí vody
i_{EKO}	[kJ/kg]	Entalpie vody za ekonomizérem
Δi	[kJ/kg]	Entalpický spád na přehřívák
i_{vyp}	[kJ/kg]	Entalpie za výparníkem
i_{vys}	[kJ/kg]	Entalpie výstupní sodíku
i_{vst}	[kJ/kg]	Entalpie vstupního sodíku
m_{Na}	[kg/s]	Hmotnostní tok na straně sodíku
m_{H_2O}	[kg/s]	Hmotnostní tok na straně páry

n_{trubek}	[ks]	Počet trubek trubek
d_1	[m]	Vnitřní průměr trubky
d_2^{91}	[m]	Vnější průměr trubky
w_{Na}^{91}	[m/s]	Střední rychlost sodíku v článku
$k_{91}^{\text{článek}}$	[W/m ² K]	Součinitel prostupu tepla v článku
λ_{oceli}	[W/mK]	Tepelná vodivost
$\rho_{Na}^{\text{stř}}$	[kg/m ³]	Hustota pro střední teplotu
$\eta_{Na}^{\text{stř}}$	[Pa·s]	Dynamická viskozita pro střední teplotu
$\lambda_{Na}^{\text{stř}}$	[W/m·K]	Tepelná vodivost pro střední teplotu
$\nu_{Na}^{\text{stř}}$	[W/m ² K]	Součinitel přestupu tepla pro střední teplotu
α_{Na}^{91}	[°C]	Součinitel přestupu tepla

Úvod:

V dnešních dobách při zvyšování primárních energetických zdrojů je snahou úspora, zvyšování účinnosti elektráren a zpomalit tak klesání zásob neobnovitelných zdrojů. Hledají se nové technologie a zdokonalují se staré. Velký pokrok zaznamenáváme v jaderné energetice, která má své místo ve světové energetice.

Jaderná energetika a využívání jaderných zdrojů elektrické energie je v současnosti velmi probírané téma. Představuje velký zdroj docela čisté energie. Jsou známa i jiná využití jaderných elektráren než na výrobu elektřiny, například odsolování mořské vody nebo výroba vodíku. Velkým problémem jaderné energetiky je její finanční náročnost a následné uskladnění vyhořelého paliva.

Velký technologický pokrok představují jaderné elektrárny IV. generace, které vzchází na základě technologického pokroku elektráren nižší generace. U elektráren IV. generace, kde je snaha zvýšit účinnost a bezpečnost se radikálně mění technologie. Jeden z hlavních rozdílů je změna chladicího média, například reaktory chlazené tekutým sodíkem, plynem nebo tekutým olovem.

Reaktory chlazené sodíkem jsou provozovány už řadu let, a díky tomu jsme získali cenné zkušenosti. Další výhodou, kterou přináší je uzavřený palivový cyklus.

Řešení parního generátoru pro jadernou elektrárnu chlazenou tekutým sodíkem je velmi náročné a představuje jednu z nejsložitějších částí elektrárny. Například využíváme mezivýměníku, které rozdělují elektrárnu na více okruhů. Dále jsou zde problémy s těsností parního generátoru, což je taky otázka bezpečnosti, protože sodík bouřlivě reaguje s vodou a taky reaguje s někdy používaným oxidem uhličitým.

1. Rychlé reaktory

Hlavní rozdíl rychlých reaktorů oproti klasickým reaktorům je ten, že neutrony uvolněné štěpením se nemoderují (nezmenšuje se jejich rychlost). U neutronů pomalých je vyšší pravděpodobnost, že dokáží způsobit řetězovou reakce než u rychlých neutronů. Proto musí být neutronů více, aby se udržela štěpná reakce, a v důsledku dochází i k vyššímu počtu štěpení. Aby mohl být zajištěn vyšší počet štěpných reakcí, musí být palivo více obohaceno štěpnými izotopy. U reaktoru BN-600 se články obohacují od 17 do 26 %. U klasických reaktorů je obohacení 3 – 4 %. Samozřejmě při vyšším počtu štěpných reakcí vzniká mnohem více tepla. Proto potřebuje mnohem efektivnější chlazení. Často se chladí tekutým sodíkem, který dokáže toto teplo přenést (často se využívá i tekutého olova). Ovšem stabilní sodík při reakci s neutronem se přeměňuje na sodík radioaktivní. Proto se využívá dalšího okruhu. Teplo z primárního sodíkového okruhu se přenáší do dalšího sodíkového okruhu a až mezi druhým a třetím okruhem dochází k výměně mezi sodíkem a vodou.

1.1. Rychlý reaktor množivý

V reaktorech se nedá štěpit uran 238, kterého se v přírodě vyskytuje přes 99 %, a proto se nedá používat jako čisté palivo. Ovšem při reakci neutronu s jádrem uranem 238 vzniká uran 239, který se při rozpadu přeměňuje na plutonium 239. Plutonium 239 se už štěpit dá v rychlých i pomalých reaktorech. Na plutonium 239 se přeměňuje uran 238 i v klasických reaktorech, ale v malém množství. Ale v reaktorech rychlých kde je velmi velká intenzita pole neutronů dochází k intenzivní přeměně z uranu 238 na plutonium 239. Při dobrém nastavení podmínek celého procesu jaderné reakce v reaktoru je větší produkce plutonia 239 než jeho spotřeba. Takový reaktor se označuje jako množivý. Tedy množivý reaktor produkuje palivo i pro klasické reaktory. A taky zvyšují spotřebu přírodního uranu.

1.2. Základní druhy rychlých reaktorů IV. generace podle druhu chlazení

1.2.1. Plynem chlazený rychlý reaktor

Aktivní zóna těchto reaktorů je chlazena plynem, nejčastěji héliem nebo oxidem uhličitým. Rychlé spektrum neutronů v uzavřeném palivovém cyklu zajišťuje štěpení. Celý systém využívá Braytonův cyklus. Hélium je ohřáto v reaktoru a dále je přiváděno na turbínu.

1.2.2. Olovem chlazený rychlý reaktor

U rychlých reaktorů tohoto typu je aktivní zóna chlazená roztaveným olovem nebo jeho slitinami (nejčastěji olovo-bismut). Taktéž jako u plynem chlazených reaktorů, rychlé spektrum neutronů v uzavřeném palivovém cyklu zajišťuje štěpení.

1.2.3. Sodíkem chlazený rychlý reaktor

K chlazení těchto reaktorů se využívá roztavený sodík. U tohoto případu jde o reaktor s vysokoenergetickými neutrony a má taky uzavřený palivový cyklus.

V dalším zbytku se práce zabývá jen koncepcí sodíkem chlazených rychlých reaktorů a parních generátorů pro tuto koncepci.

2. Tepelné výměníky a parní generátory

Zařízení sloužící k předání tepla z jedné látky do druhé je výměník tepla.

V jaderné energetice nejvíce využíváme povrchové rekuperační výměníky. Povrchové rekuperační výměníky jsou výměníky, u kterých ohřáté médium, proudící po jedné straně teplosměnné plochy předává teplo prostupem stěny látky teprve ohřívané, proudící současně po druhé straně této plochy.

V jaderné energetice výhodou těchto výměníků je, že oddělují primární okruh od sekundárního, čili radioaktivní okruh od neradioaktivního.

2.1. Tepelné výměníky a parní generátory s tekutými kovy

V jaderných elektrárnách bývají takzvané mezivýměníky a parní generátory. Mezivýměník je výměník tepla mezi sodíkem primárního a sodíkem sekundárního okruhu. Parní generátor je výměník mezi sodíkem sekundárního okruhu a vodou a vodní párou terciálního okruhu.

Chladicí médium u rychlého reaktoru musí z malé kompaktní aktivní zóny rychlého reaktoru odvádět poměrně vysoký tepelný výkon a v co nejmenší míře zpomalit a zachytit rychlé neutrony. Těmto vlastnostem vyhovuje hlavně sodík, jehož vysoký součinitel tepelné vodivosti λ taky souvisí s možností dosáhnutí vysokých přestupu tepla α (okolo $10^4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Další výhody použití sodíku pro výměníky tepla v jaderných elektrárnách je, že se prakticky nerozkládá vlivem záření a vysokých teplot. Jeho vysoký bod varu umožňuje dosahovat, při relativně nízkých tlacích (desetiny megapascalu), vysokých teplot v kapalném stavu. Což je velkou výhodou oproti tlakovodním reaktorům, protože není potřeba ocelových nádob s tak moc silnými stěnami.

Nepříjemnou vlastností sodíku je reakce s kyslíkem (ve vzduchu i ve vodě), při styku těchto dvou látek dojde k nebezpečné explozi. Když reaguje sodík s vodou při teplotách do 300°C vzniká hydroxid sodný NaOH , hydrid NaH a za vyšších teplot oxid sodný Na_2O a vodík H_2 za velkého vývinu tepla, který způsobí i nárůst tlaku.

Díky těmto okolnostem v jaderných elektrárnách se sodíkem chlazeným reaktorem jsou parní generátory, kde probíhá výměna tepla mezi sodíkem a vodou, těmi nejnáchylnějšími místy v elektrárně.

K poměrně vysokým dosažitelným teplotám sodíku v tekutém stavu, můžeme vyrábět v parogenerátorech přehřátou páru vysokých parametrů. Tím pádem můžeme používat parních turbín s vysokými parametry admisní páry. A tímto se zvyšuje účinnost elektrárny.

3. Tekuté kovy jako teplotní nosič

Tekuté kovy jsou schopny odvádět vysoké tepelné výkony z malé kompaktní aktivní zóny, díky svému velkému součiniteli tepelné vodivosti λ . Velký součinitel tepelné vodivosti je potřeba právě u rychlých reaktorů.

Tekuté kovy jako teplotní nosič mají nízké tlaky v kapalném stavu při vysokých teplotách.

3.1. Optimální teplotní nosič

- Měl by mít co nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku
- Měl by mít velký součinitel tepelné vodivosti
- Měl by mít vysoký bod varu
- Naopak by měl mít nízký bod tání
- Měl by mít nízký potřebný čerpací výkon
- Měl by být nekorozivní
- Odolný vůči teplotám a záření
- Cena by měla být co nejnižší
- Měl by mít malý účinný průřez pro zachyt neutronů (z hlediska jaderně-fyzikálního by měl mít teplo nosič primárního okruhu malý absorpční průřez u tepelných reaktorů pro tepelné neutrony a u rychlých reaktorů pro rychlé neutrony)

Teplotní nosič	λ	c_p	$\eta \cdot 10^6$	Pr	$p_{\text{nasycené}}$	ρ	$t_{\text{tání}}$	t_{varu}
	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$		Mpa	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
H ₂ O	0,663	4,497	134,3	0,9106	1,5536	864,74	0	100
D ₂ O	0,592	4,472	151,9	1,09	1,546	958,22	3,8	101,1
Dowtherm	0,112	2,068	309,1	8,6	0,245	909	12,5	258
He	0,213	5,2	27	0,667		0,10332		
Vzduch	0,037	1,0245	25,12	0,738		0,76194		
CO ₂	0,028	0,9927	22,37	0,72		1,122		
H ₂	0,276	14,5043	12,1	0,666		0,05294		
Na	81,4	1,327	457	0,007		903	97,7	880
NaK	25	1,027	374	0,016		828	-11	784
PbBi	11,75	0,147	2548	0,03		10486	123,5	1670

Tab. 3.1. Vlastnosti vybraných teplotních nosičů

V tabulce u teploty tání a teploty varu jsou hodnoty pro tlak 0,101325 MPa. Další hodnoty u kapalin platí pro teplotu 200°C na dolní mezní křivce a pro plyny a tekuté kovy jsou hodnoty pro 200°C a tlak 0,101325 MPa.

4. Sodík jako teplotosič

V současné době je nejvíce používaným chladícím médiem pro rychlé reaktory. Má mnohem vyšší součinitel tepelné vodivosti než draslík. Díky malé hustotě sodíku je potřebná čerpací práce taky malá. Ovšem velkou nevýhodou sodíku je, že dochází k explosivní reakci při styku s vodou nebo se vzduchem. Za vyšších teplot je také sodík korozivní, avšak podstatně méně než lithium, cín nebo vismut a při vyšších rychlostech proudění i erozivní vůči konstrukčním materiálům. Sodík má bod tání při 98°C za atmosférického tlaku, tudíž za pokojové teploty je ve stavu tuhém. Ovšem sodík používaný v jaderné energetice není nikdy absolutně čistý. Tím podstatně vzrůstá jeho teplota tání. Jelikož nesmí dojít k zatuhnutí sodíku v systému, musí se potrubí a nádrže elektrickým ohřevem udržovat na teplotě minimálně 150°C. Cely systém a jeho části před jeho naplnění tekutým sodíkem nahřívají na teplotu 200-250°C.

4.1. Nejznámější slitiny sodíku používané jako chladící médium

4.1.1. Slitina sodíku s draslíkem NaK (22,8% Na + 77,2% K)

Výhodou této slitiny je, že bod tání této slitiny je při teplotě -12,3°C a tedy za pokojové teploty jsou ve stavu kapalném. Ale vysoký obsah draslíku ve slitině snižuje přenos tepla a také zvyšuje korozivnost. Absorpční průřez pro neutrony se také zvětšuje se zvyšujícím se podílem draslíku. Nebezpečí výbuchu zůstává stejné jako u samotného sodíku.

4.1.2. Slitina olova s vizmutem PbBi (44,5% Pb + 55,5% Bi)

Jedinou výhodou této slitiny ve srovnání s Na, K, NaK je, že tato slitina nemá reakci při styku s vodou nebo vzduchem. Má vysokou hustotu a proto je potřeba vysoké potřebné čerpací práce. I v ostatních vlastnostech je ve srovnání horší.

Pro chlazení reaktoru byly uvažovány i jiné tekuté kovy jako například: rtuť, cín, lithium, cesium, galium. Ovšem u všech těchto kovů se došlo k závěru, že jsou méně vhodné než sodík a jeho slitiny.

4.2. Chování sodíku ve styku s oceli

Čistý sodík sám o sobě není příliš agresivní vůči ocelím. Jenomže oxidy obsažené v sodíku zvyšují rychlost koroze. Rychlost koroze se zvyšuje s rostoucím podílem kyslíku

v sodíku (limitní je hmotnostní koncentrace 0,005%). Kyslík také způsobuje snižování mechanických vlastností a teky křehnutí oceli.

Nepříznivou vlastností sodíku (i ostatních tekutých kovů) při jejich působení na oceli, je rozpouštění některých složek oceli v sodíku, které dále roznáší po celém systému. Například tekutý sodík oduhličuje perlitické oceli a naopak nauhličuje austenitické oceli. Z toho plyne, že není vhodné používat obou druhů ocelí v jednom okruhu.

Pro součásti parních generátorů, jež jsou v přímém kontaktu se sodíkem, za teplot nižších než 450°C, se mohou používat chrommolybdenové oceli (2,25–5% Cr, 1% Mo) s přidavkem vanadu a niobu ($\leq 0,3\%$). A pro vyšší teploty do 550°C se mohou použít chrommolybdenové oceli s vyšším obsahem vanadu a niobu.

U perlitických ocelí bylo experimentálně zjištěno snížení pevnostních charakteristik při mezním oduhličení až o 10% - 15%, které je reálné u parogenerátorů. Při oduhličování dochází k přenosu uhlíku sodíkem po okruhu, a proto není možné vhodné používat oxidu uhličitý jako plynového polštáře (parní generátor je propojen s kompenzační nádrží, jehož součástí je plynový polštář, který má ztlumit první tlakovou vlnu při havarijním průniku vody do sodíku).

Československá 1. brněnská strojírna, která vyráběla články parních generátorů pro výměnu tepla se sodíkem, úspěšně použila nízkolegované oceli ČSN 15 313. Zjistili o těchto nízkolegovaných ocelích (2,25% Cr, 1% Mo), že lépe odolávají namáhání a tepelným rázům než nerezové oceli a navíc vykazují minimální korozi na straně, kde proudí voda i na straně kde proudí tekutý sodík.

Austenitické chromniklové oceli jsou schopny odolávat sodíku až do teplot 900°C.

Ideální rychlost sodíku v trubkách je $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost sodíku by neměla přesáhnout $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kvůli erozi trubek. Dále je nutný spád v potrubí (minimálně 3%), kvůli zajištění dokonalého vyprázdnění trubek při vypouštění sodíku.

Tloušťku stěny trubek je vhodné volit minimálně 2,5mm z důvodu, aby možné škrábnutí trubky neproděravělo trubky. Kvůli požadované bezpečnosti čili těsnosti je snahou všechny spoje trubek kvalitně svařovat a svary pečlivě překontrolovat. Demontáž trubek a spojů se provádí řezáním autogenem a zpětná montáž opětovným svařováním.

5. Typy konstrukčních řešení parních generátorů s tekutým sodíkem

Jsou zde popsána zjednodušená schémata konstrukčních řešení parních generátorů, u nichž je ohřívajícím médiem tekutý sodík a médiem ohřívaným je voda a vodní pára.

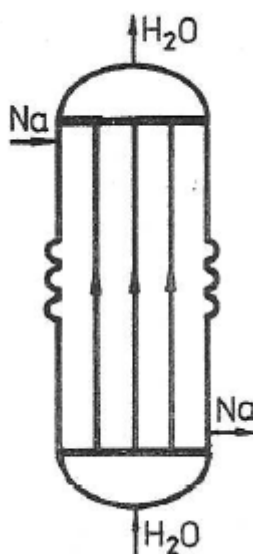
Jedním z důležitých kritérií pro rozdělení parních generátorů je rozdělení podle velikosti průměru pláště.

5.1. Řešení pro tělesový nebo makromodulový parní generátor s přímými trubkami

Trubky jsou přivařeny nahoře i dole do trubkovnice. Vzájemná tepelná dilatace mezi svazkem trubek a pláštěm je vyřešena měchovým kompenzátorem na plášti. Tento typ parního generátoru byl použit na reaktorech BN 600 a SNR 300.

Tělesové (korpusové) parní generátory mohou mít průměr pláště okolo 3 m a více. Jsou pro největší výkony.

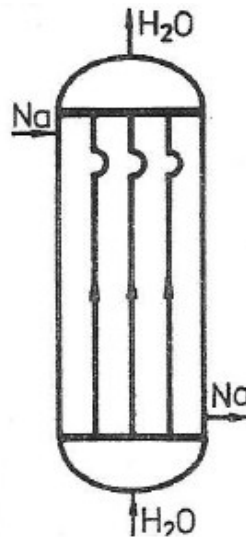
Makromodulové (makročlánekové) parní generátory mají články o průměru až 1,5 m nebo mikromodulové (mikročlánekové) parní generátory mají články o průměru do 300 mm. (jeden mikročlánek může obsahovat třeba 20 trubek)



Obr. 5.1. Tělesový nebo makromodulový parní generátor s přímými trubkami

5.2. Řešení pro tělesový nebo makromodulový parní generátor s přímými trubkami

Trubky jsou přivařeny nahoře i dole do trubkovnice. Vzájemná tepelná dilatace mezi svazkem trubek a pláštěm je vyřešena kompenzačními ohyby na trubkách. Tato koncepce se použila pro jeden z makromodulový přehřívák páry u reaktoru BN 600.



Obr. 5.2: Tělesový (korpusový) nebo makromodulový parní generátor s přímými trubkami

5.3. Řešení tělesového typu s trubkami ve tvaru U

Právě tvarem trubek do U, je zde výborně vyřešena dilatace mezi jednotlivými trubkami navzájem, ale i mezi pláštěm a trubkami.

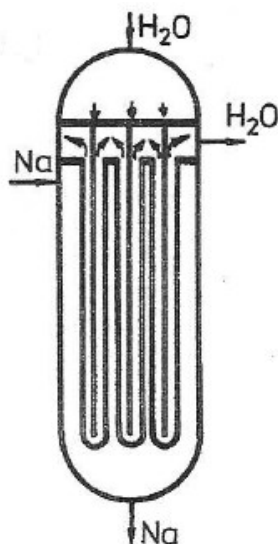
Tato koncepce byla použita pro výparník v Anglii pro reaktor typu PFR.



Obr. 5.3: Tělesový typ parního generátoru s trubkami ve tvaru U

5.4. Řešení je tělesové s Fieldovými trubkami

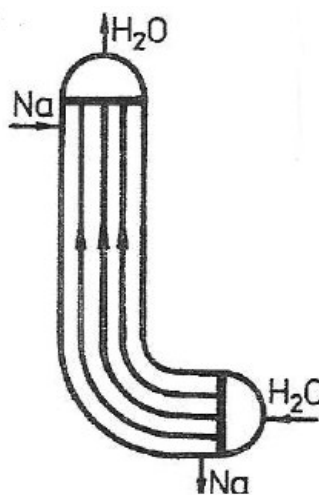
Toto řešení je vhodné použít jako výparník. Vnitřními Fieldovými trubkami vstupuje voda a proudí jimi dolů. Trubky jsou přivařeny pouze k horní trubkovnici. Voda dole mění směr a proudí vzhůru, ale už jako směs vody a páry, v mezikruhovém prostoru Fieldových trubek. Tato koncepce se používala u prvních výparníků parních generátorů u reaktoru BN 350 (sovětská konstrukce).



Obr. 5.4: Tělesový typ parního generátoru s Fieldovými trubkami

5.5. Řešení parního generátoru do tvaru L

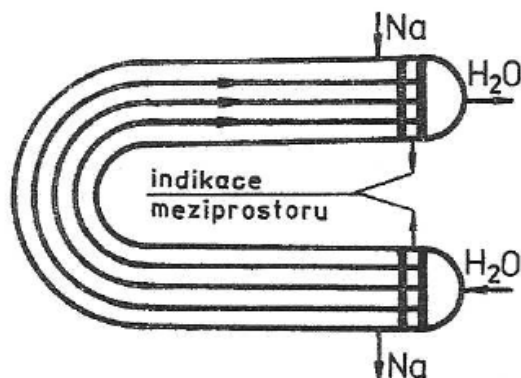
Má trubkovnici přivařenou k plášti a obou koncích, do nichž jsou navařeny i všechny trubky. U této konstrukce jsou taky dobře vyřešeny dilatace. Tuto konstrukci použili Američané u parního generátoru pro reaktor v Clinch River. Konstrukční řešení parního generátoru do tvaru L.



Obr. 5.5. Tělesový nebo makromodulový parní generátor s přímými trubkami

5.6. Řešení kde je svazek trubek i plášť ve tvaru U

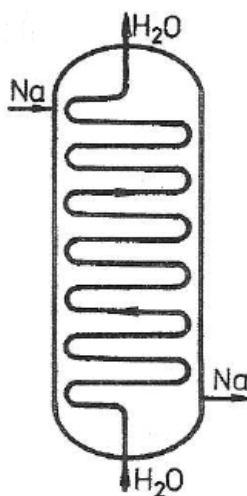
Toto řešení je taky výborné vůči veškerým dilatacím. Na obou koncích jsou trubkovnice a k nim jsou přivařeny trubky. Tato koncepce se používala přehříváky páry u prvních parních generátorů u reaktoru BN 350 (sovětská konstrukce).



Obr. 5.6. Konstrukční řešení parního generátoru kde je svazek trubek i plášť ve tvaru U

5.7. Řešení vhodné pro mikromodulové parní generátory

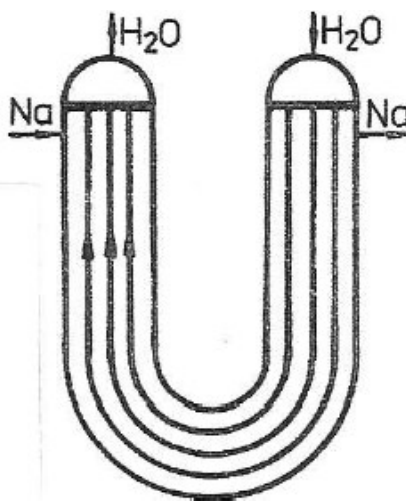
Tato koncepce také výborně vyrovnává dilatace. Jsou zde použity dvojité trubkovnice k nimž jsou trubky přivařeny na obou koncích. Meziprostor mezi trubkovnicemi slouží ke zjištění případných netěsností. Protože nejpravděpodobnější místo vzniku netěsností je u svarů trubek s trubkovnicemi. Meziprostor je vyplněn například heliem. Případná netěsnost se dá zjistit chemickým vzorkováním. Nebo ze změny tlaku v meziprostoru. Pokud má látka v meziprostoru tlak větší než sodík a menší než voda, můžeme usoudit, že nastala netěsnost ve svaru trubky s trubkovnicí. Parní generátory této konstrukce vyrobila 1. brněnská strojírna pro reaktory BOR 60 a BN 350.



Obr. 5.7. Konstrukční řešení pro mikromodulové parní generátory

5.8. Řešení tělesového parního generátoru s paralelně řazenými trubkovými hady

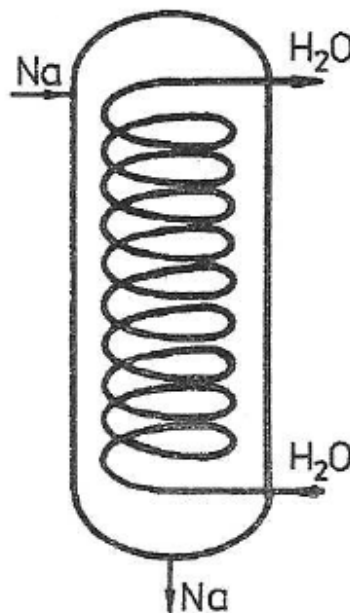
Toto konstrukční řešení se neosvědčilo u prvních sovětských parních generátorů u reaktoru BOR 60 a později byly nahrazeny československými parními generátory článkovými.



Obr. 5.8. Konstrukční řešení tělesového parního generátoru s paralelně řazenými trubkovými hady

5.9. Řešení tělesového parního generátoru s do šroubovice vinutými trubkami

Toto řešení s vinutými trubkami do šroubovice je vhodné pro reaktory velkého výkonu a bylo použito u reaktoru Super Phénix 1.



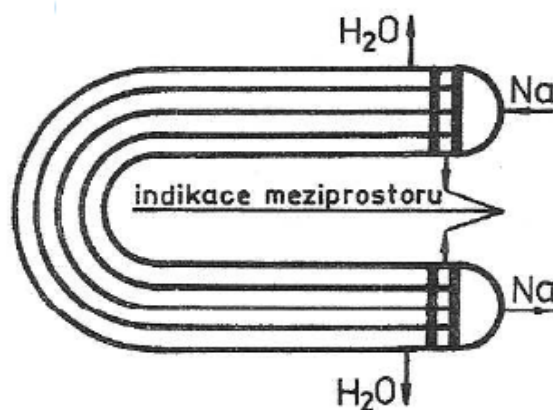
Obr. 5.9. Konstrukční řešení tělesového parního generátoru s do šroubovice vinutými teplosměnnými trubkami

5.10. Inverzní parní generátor

Jedná se o řešení, kde na rozdíl od ostatních je sodík v trubkách a voda a vodní pára je v plášti. Tato konstrukce není ekonomicky výhodnější oproti přímým parním generátorům, protože u nich vodní pára a voda koluje v trubkách a má vyšší tlak než sodík v plášti. Takže se mohlo ušetřit na materiálu stěny pláště. V inverzním parním generátoru proudí voda a vodní pára v plášti a sodík v trubkách, a protože má voda vyšší tlak musí být stěna pláště silnější a spotřeba materiálu roste.

Na druhou stranu dosahuje větší bezpečnosti. Dojde-li k netěsnosti, bude vnikat voda o větším tlaku do trubek se sodíkem, nemůže se chemická reakce mezi sodíkem a vodou, v malém prostoru trubky plně rozvinout a utlumí se (za předpokladu že jsou trubky malých průměrů). U přímých parních generátorů při vzniku netěsnosti bude unikat voda z trubky ven do pláště, ve kterém je sodík. A protože je v plášti větší prostor, může se chemická reakce rozvinout explozivně.

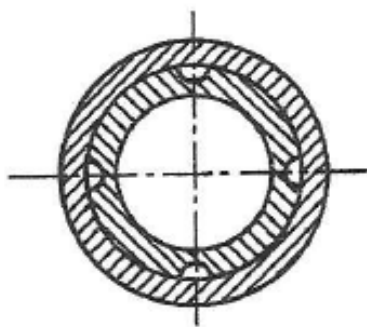
Parní generátor inverzní mikromodulový článkový pracuje v současné době u reaktoru BOR 60 od 1. brněnské strojírny.



Obr. 5.10. Inverzní parní generátor

Pro zvýšení bezpečnosti proti explozi sodíku a vody bylo vymyšleno bezpečnostní opatření dvojitých trubek.

Dvě souosé trubky se do sebe nasunou, tak aby prostor v mezikruží byl co nejmenší. Tento vlastní indikační prostor je vyplněn látkou, která nereaguje s vodou ani sodíkem, třeba heliem. Jenomže tato mezera výrazně zhoršuje podmínky pro přestup tepla mezi sodíkem a vodou. Tento problém se vyřešil těsným nasunutím trubek na sebe bez mezikruhového prostoru, ale jsou opatřeny drážkami buď přímými, nebo šroubovitě vinutými.

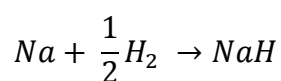
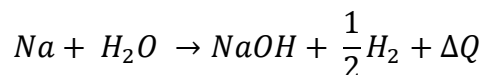


Obr. 5.11. Řez dvojitou trubkou s drážkami

6. Chemické reakce Na-CO₂ a Na-H₂O a jejich vliv na bezpečnost

6.1. Porovnání chemických reakcí dle vývinu tepla

V případě, že dojde k porušení integrity trubek v parogenerátoru, tj. v tepelném výměníku sodík-voda, voda o vyšším tlaku začne pronikat do sodíku a dochází k různým chemickým reakcím v závislosti na teplotě. Do teploty 300 °C probíhá reakce dle rovnic:

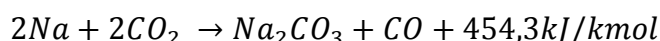
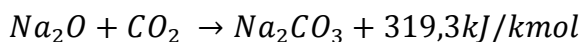
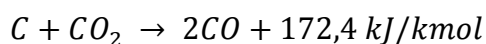
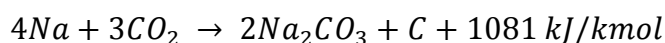
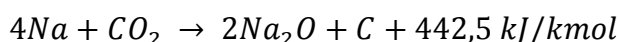


Od teploty 300 °C chemická reakce probíhá dle rovnice:



Je možno poznamenat, že při obou reakcích vzniká vodík, který je ve styky se vzduchem výbušný, a obě reakce jsou exotermické.

V případě netěsnosti u tepelného výměníku sodík-oxid uhličitý dochází opět k pronikání vysokotlakého oxidu uhličitého do sodíku. Může zde docházet v závislosti na tlaku a teplotě k následujícím reakcím:



Většina produktů těchto chemických reakcí jsou v pevné fázi a nejsou explozivní. Ovšem teplo generované těmito reakcemi je srovnatelné nebo větší než teplo vznikající z reakcí sodík – voda.

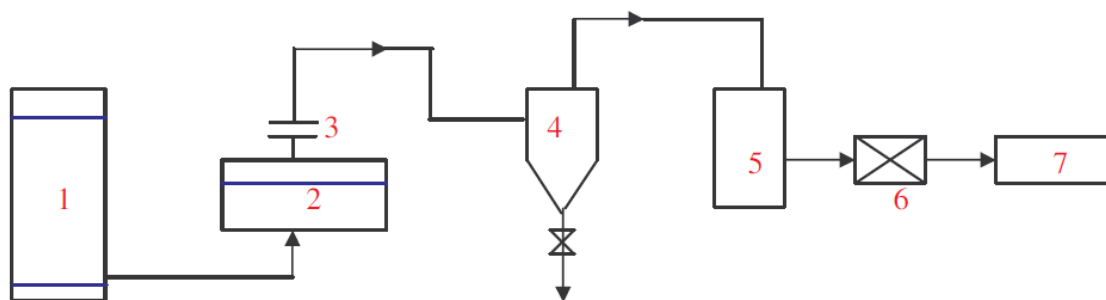
6.2. Porovnání chemických reakcí dle kinetiky

Kinetika reakcí se zabývá rychlostí, jakou reakce probíhá. Rychlost reakce má velký vliv na bezpečnost v případě netěsnosti.

Chemická reakce sodík – voda probíhá velmi rychle (v podstatě explozivně), přímým následkem je i velký nárůst teploty a tlaku (mj. i díky uvolňování vodíku).

Oproti reakci sodík-voda mají reakce sodík-oxid uhličitý zcela jiný průběh. Rychlost chemické reakce mezi kapalným sodíkem a plynným oxidem uhličitým je mnohem pomalejší než reakce sodík – voda. Všeobecně lze říci, že zde neprobíhá žádná okamžitá reakce, jako např. exploze a tato vlastnost činí proces interakce sodík-oxid uhličitý méně závažným než je tomu u reakce sodíku a vody.

7. Bezpečnostní systém parogenerátorů se sodíkem



Obr. 7.1. Schéma havarijního systému

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1- Parogenerátor | 5- Zásobník plynu |
| 2- Kompenzační nádrž | 6- Zařízení na spalování plynu |
| 3- Havarijní membrána | 7- Nádrž |
| 4- Separátor kapalných a pevných produktů reakce od vodíku | |

Tento havarijní systém se spojuje se sodíkovou stranou parního generátoru, aby se zabránilo jeho protržení pláště způsobené průnikem vody do sodíku a následně explozi.

Parní generátor (1), jeho sodíková strana, je propojen s kompenzační nádrží (2), ve kterém je plynový polštář s například argonem nebo dusíkem. Kompenzační nádrž by měla svým plynovým polštářem utlumit první vzniklou tlakovou vlnu od explozivní reakce dusíku s vodou způsobenou průnikem vody do sodíku. Pokud by se včas při tomto problému nepodařilo vypustit obě části parního generátoru a tlak by stále narůstal, došlo by k protržení havarijní membrány (3).

Někdy součásti zařízení membrány mohou být dva nože, které pomohou prorazit membránu, při tlaku vyšším než na který je membrána dimenzovaná. Po protržení membrány proudí produkty reakce dále do separátoru (4). Separátor má úlohu oddělit pevné a kapalné složky (Na, NaOH, NaH, Na₂O), od vodíku. Separace se provádí odstředivou silou. Ve spodní části separátoru se odvádějí tyto pevné a kapalné složky a horní části se odvádí vodík do zásobníku plynu (5). Vodík dále spálíme v zařízení pro spalování vodíku (6). Vzniká nám vodní pára, kterou necháme kondenzovat do nádrže (7).

Dalším opatřením u sodíkových okruhů (primární a sekundární) jsou sodíkové vypouštěcí nádrže. Do těchto nádrží můžeme úplně vypustit oba okruhy. Zase musí být

nádrže opatřeny ohříváky (nejčastěji elektrickými), pro zpětné ohřátí sodíku na provozní teplotu, aby byl opět čerpatelný čerpadly pro jeho navrácení do okruhů. Dokonce i všechna potrubí vedoucí sodík by měla být vybavena ohřevem. Ten bývá obvykle v tepelné izolaci potrubí. Před napouštěním sodíku do systému se musí potrubí i systém nahřát na teplotu 200-250°C. V sodíkových nádržích jsou rovněž plynové polštáře, protože sodík nesmí přijít do kontaktu se vzduchem.

Důležitým opatřením je, že provozní personál, údržbáři, svářeči sodíkových potrubí jsou školeni a zkoušeni pro práci se sodíkem.

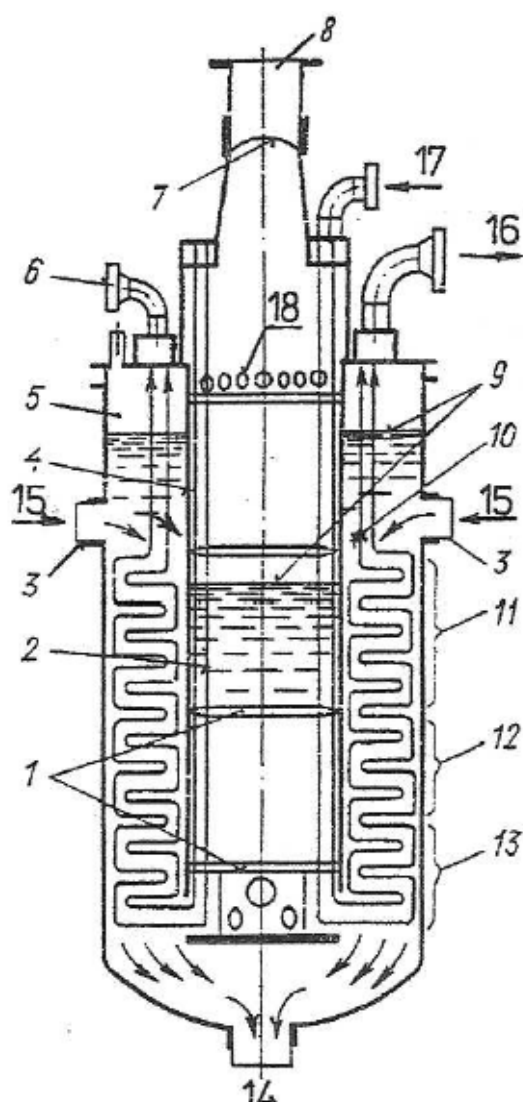
8. Příklady parogenerátorů u elektráren chlazenými sodíkem

8.1. Parogenerátor elektrárny Enrico Fermi 1 (USA)

Elektrárna Enrico Fermi 1 už je vyřazena z provozu. Měla čistý elektrický výkon 61 MW. Teplosměnnou plochu tvořily tři parní generátory. Konstrukční řešení parního generátoru bylo s 1200 paralelně zapojenými trubkovými hady o vnějším průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,1 mm.

V provozu se neosvědčily tenké trubky i jejich technologie.

Plynový polštář (5) je nad oběma hladinami sodíku (9). Tento objem tvoří kompenzační objem pro případnou havárii a únik vody do sodíku.



Popis:

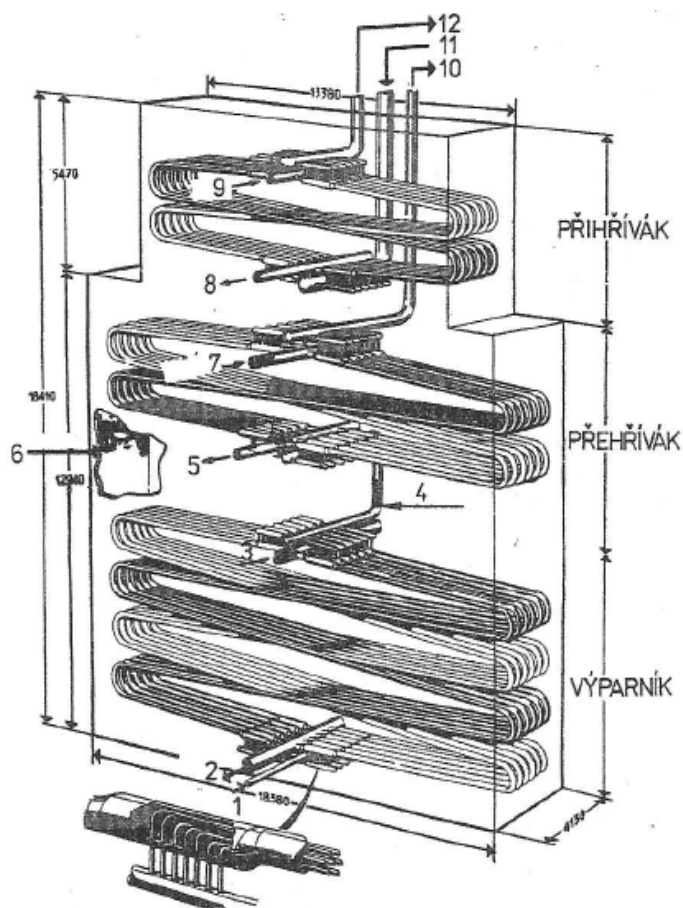
- 1- Prstence nesoucí teplosměnné trubky
- 2- Přívodní trubky napájející vody
- 3- Vstupní trubky sodíku
- 4- Centrální truba s tepelným stíněním trubek přivádějících napájející vodu
- 5- Plynový polštář
- 6- Nátrubek pojistného ventilu
- 7- Havarijní membrána
- 8- Odvod produktů reakce sodíku s vodou (při havárii)
- 9- Hladina kapalného sodíku
- 10- Výstupní trubky přehřáté páry
- 11- Přehříváková část
- 12- Výparníková část
- 13- Ekonomizérová část
- 14- Výstup sodíku
- 15- Vstup sodíku
- 16- Výstup přehřáté páry
- 17- Vstup napájející vody
- 18- Přepouštěcí otvory mezi prostorem teplosměnné plochy a centrální trubou

Obr. 8.1. Parogenerátor elektrárny Enrico Fermi 1

8.2. Parogenerátor elektrárny Phenix (FRA)

Tento parní generátor je průtočné mikromodulové konstrukce pro rychlý reaktor chlazený sodíkem o čistém výkonu 250 MW. V elektrárně jsou tři tyto parní generátory. Každý jednotlivě má dvanáct sekcí paralelně řazených (na obrázku je pouze šest sekcí). Každá sekce se skládá zvlášť z modulu přehříváku, modulu přehříváku a modulu výparníku. Tyto moduly mají tvar písmene S a jsou z plášťových trubek (obsahují sedm trubek). Trubky tvořící teplosměnnou plochu přehříváku a přehříváku jsou z austenitické nerezové oceli. U výparníku jsou trubky z oceli navíc s obsahem 2,25% chromu a 1% molybdenu.

Z bezpečnostních důvodů je lepší u sodíkových parogenerátorů nepoužívat přehříváky páry přímo v parogenerátorech.



Popis:

- 1- Vstup napájecí vody
- 2- Výstup sodíku
- 3- Vstup sodíku do výparníku
- 4- Výstup nasycené páry z výparníku
- 5- Výstup sodíku z přehříváku
- 6- Tepelná izolace
- 7- Vstup sodíku do přehříváku
- 8- Výstup sodíku do přehříváku
- 9- Vstup sodíku do přehříváku
- 10- Výstup přehřáté páry
- 11- Vstup páry do přehříváku
- 12- Výstup páry do přehříváku

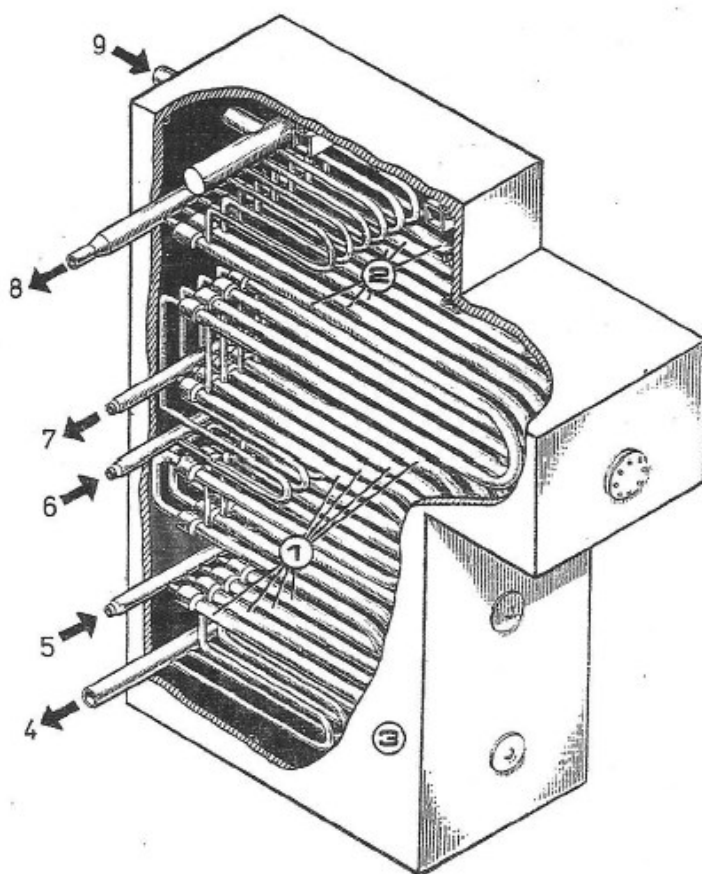
Obr. 8.2. Parogenerátor elektrárny Phenix

8.3. Parogenerátor elektrárny BOR 60

Koncepce parogenerátoru je průtočná článkový (mikromodulový). Tento parogenerátor byl vyroben v 1. brněnské strojírně pro sovětský reaktor BOR 60 s tepelným výkonem 60 MW_t a čistým elektrickým výkonem 12 MW.

Tento parogenerátor má osm paralelně zařazených sekcí a každá z nich je složena z mikromodulů ve tvaru písmene U. Mikromoduly jsou z plášťové trubky, která obsahuje 19 dalších trubek a ty jsou přivařeny na obou koncích k trubkovnici.

Při zjištění průniku sodíku do indikačního nebo průniku vody meziprostoru (poškození svarů spojující trubkovnice s trubkami), máme obvykle čas vypustit vodu i sodík z netěsného modulu a zabránit větší explozi. Dále poškozený modul můžeme vyřiznout z parogenerátoru a parogenerátor může dále pracovat. Konkrétně zde byl nasimulován umělý vstřík vody do sodíku v místech výparníkového modulu. Bezpečnostní systém situaci spolehlivě zvládnul. Při zkoumání se zjistilo, že vnitřní trubky byly zničeny, ale plášťová trubka nebyla poškozena. Toto je výhoda mikročláňkových parogenerátoru. Toto bylo experimentálně učiněno na československém parogenerátoru.



Popis:

- 1- Výparníková část
- 2- Přehřívací část
- 3- Hermetický plášť
- 4- Výstup sodíku
- 5- Vstup napájecí vody
- 6- Vstup páry do přehříváku
- 7- Výstup páry do výparníku
- 8- Vstup přehřáté páry
- 9- Vstup sodíku

Obr. 8.3. Parogenerátor elektrárny BOR 60

Reaktor BOR 60 s tímto parogenerátorem byl instalován v dnešním Rusku v Melekesu. Tento parogenerátor pracoval bezporuchově od roku 1973 do roku 1980.

Tepelný výkon tohoto parogenerátoru je 30 MW_t, vstupní teplota sodíku je 565°C a výstupní je 320°C, provozní tlak sodíku je 0,6 MPa a jeho tlaková ztráta je

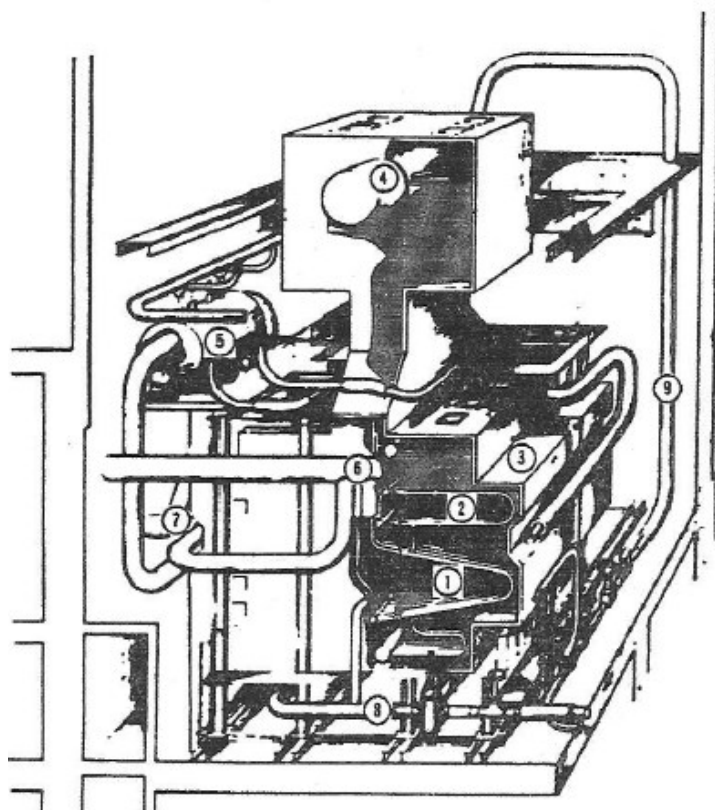
0,1 Mpa. Parní výkon je $42 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ páry o tlaku 10 Mpa a teplotě 540°C . Napájecí voda o teplotě 215°C .

8.4. Parogenerátor “Nad’a”

Parogenerátor “Nad’a” je článkový (mikromodulový) parogenerátor, vyrobený v 1. brněnské strojírně. Tento parogenerátor vznikl na základě zkušeností s prvním československým parogenerátorem (30 MW). Parogenerátory tohoto typu byly dodány do Ševčenska (Mangyšlaku), pro reaktor BN 350, o elektrickém výkonu 150 MW. Parogenerátor má tepelný výkon 200 MW_t .

Ve výparníku je přirozená cirkulace vody s 64 paralelně řazenými větvemi.

Parogenerátory “Nad’a” nahradily některé sovětské parogenerátory s Fieldovými trubkami.



Popis:

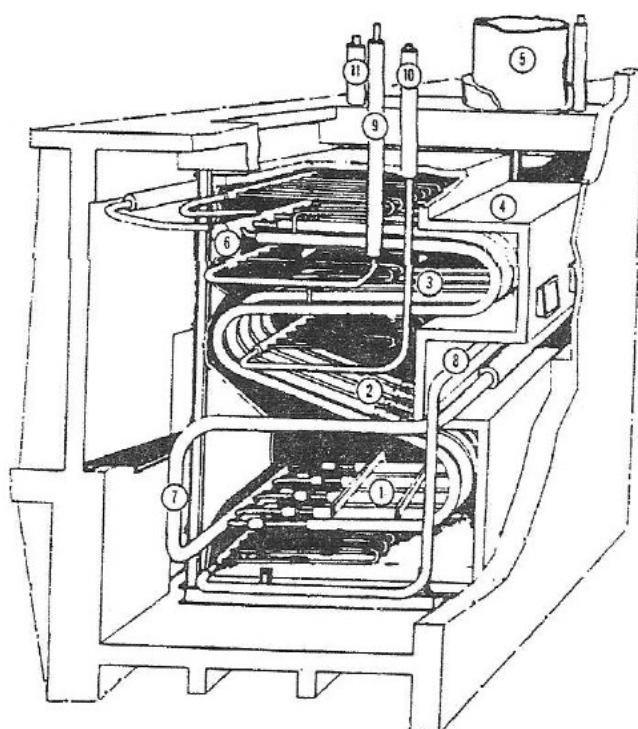
- 1- Výparník
- 2- Přehřívák
- 3- Tepelně izolovaný box
- 4- Buben (k dělení vody a páry)
- 5- Vyrovnávací nádrž
- 6- Vstupná sodíku
- 7- Výstup sodíku
- 8- Parní potrubí
- 9- Potrubí napájecí vody

Obr. 8.4. Parogenerátor “Nad’a”

8.5. Inverzní průtočný modulový parogenerátor u reaktoru BOR 60

Po vyřazení našeho prvního parogenerátoru u reaktoru BOR 60 o tepelném výkonu 30MW v roce 1981 byl zase od 1. brněnské strojírny u stejného reaktoru nainstalován nový inverzní průtočný parogenerátor o tepelném výkonu 30 MW. U tohoto typu parogenerátoru

proudí sodík ve vnitřních trubkách a voda a vodní pára proudí v plášťových trubkách. Parogenerátor je mikromodulového typu a má osm paralelně řazených větví. Každá větev je tvořena sériově zapojenými mikromoduly ekonomizéru, výparníku a přehříváku. Modul přehříváku a výparníku má tvar písmene J. Tvar přehřívákového modulu je tvar písmene U. Moduly obsahují 19 paralelně řazených trubek o průměru 25 mm, ve kterých proudí sodík. Jsou uloženy v plášťové trubce o průměru 194 mm a tloušťce 12mm. Všechny vnitřní trubky jsou přivařeny k dvojitém trubkovnicím (indikace meziprostoru). Celý parogenerátor je hermeticky izolován a má elektrické ohříváky.



Popis:

- 1- Ekonomizér
- 2- Výparník
- 3- Přehřívák
- 4- Izolovaný box
- 5- Vyrovnávací nádrž
- 6- Vstupní sodíková komora
- 7- Sodíkové potrubí
- 8- Potrubí napájející vody
- 9- Parní potrubí
- 10- Parní potrubí od separátoru
- 11- Potrubí přehřáté páry

Obr. 8.5. Inverzní průtočný modulový parogenerátor u reaktoru BOR 60

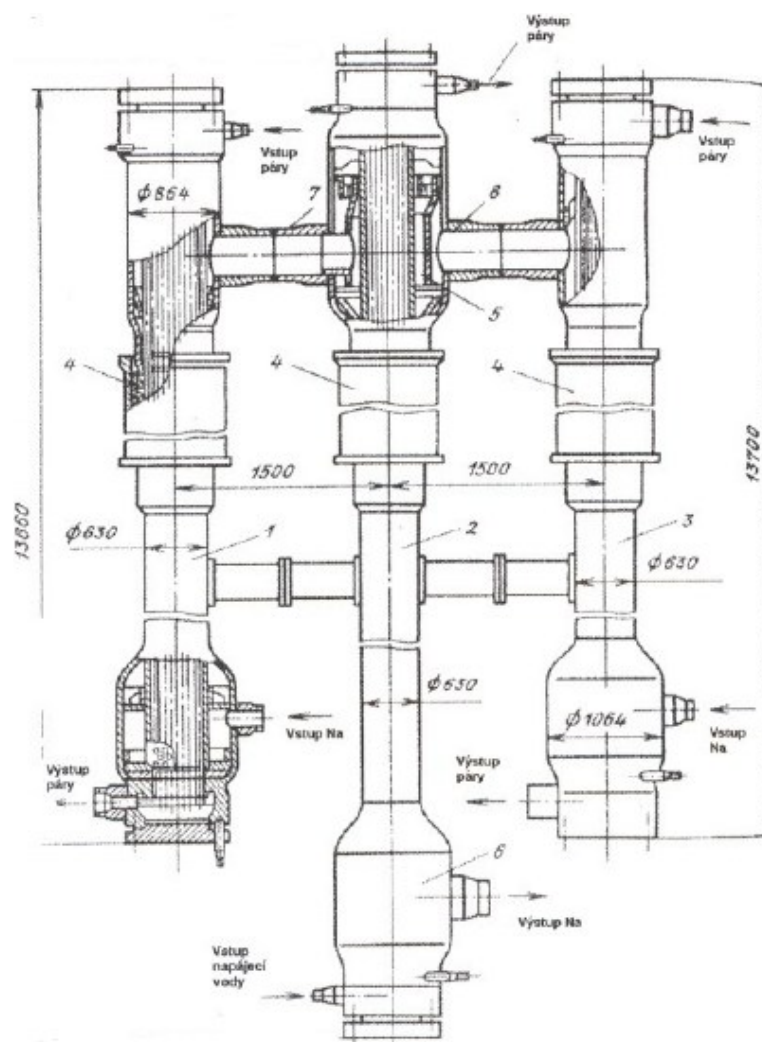
8.6. Parogenerátor PGN-200M jaderné elektrárny BN 600

Potřebný parní výkon parního generátoru je dosažen řazením do sekcí. Každá sekce má tři moduly: výparník, ekonomizér a přehřívák. Všechny moduly jsou tvořeny plášťovými trubkami s distančními kompenzátory, v níž jsou uloženy svazky trubek s přímými trubkami přivařené k trubkovnicím ve spodní a horní části.

Tento typ parogenerátoru je na reaktoru BN 600 doposud.

Parametr:	Velikost:
Pára-voda:	
Teplota generované páry	505°C
Tlak generované páry	14 MPa
Teplota napájecí vody	241°C
Tlak napájecí vody	17 MPa
Teplota přehřáté páry	500°C
Tlak přehřáté páry	2,8 MPa
Sodík:	
Teplota na vstupu do přehříváku a přehříváků	518°C
Teplota na výstupu z jedné sekce	328°C
Tepelný výkon jedné sekce	61,2MW
Počet sekcí	8
Celkový výkon PG ve smyčce	490 MW

Tab. 8.1. Technické parametry Parogenerátoru PGN-200M



Obr. 8.6. Parogenerátor PGN-200M

Popis:

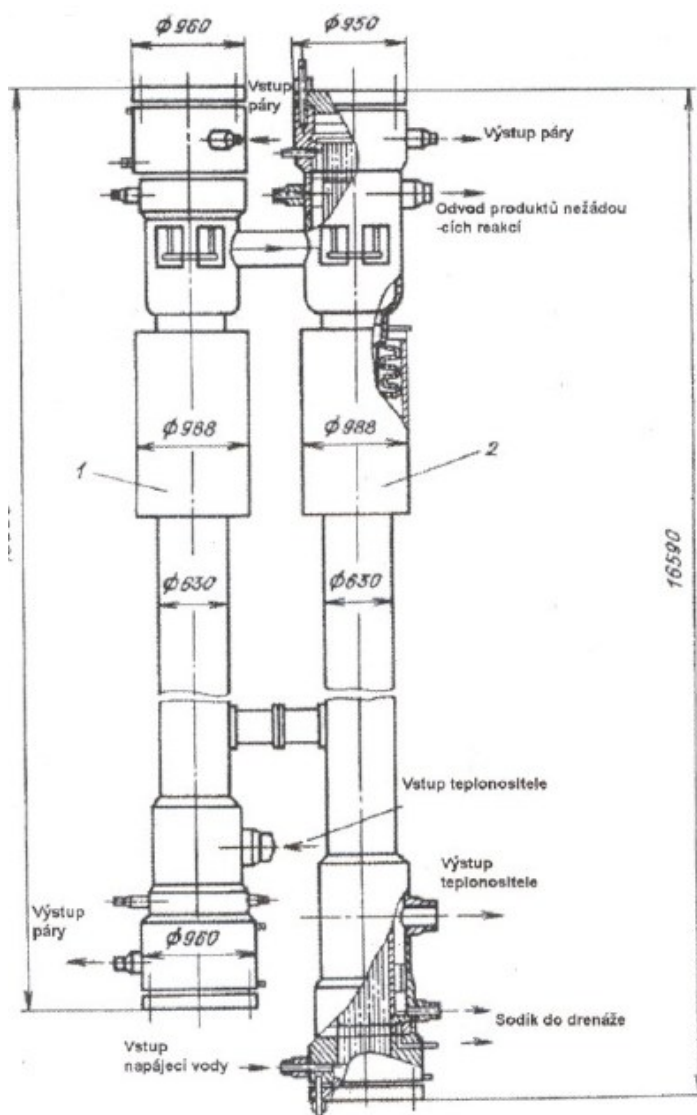
- 1- Přehřívák
- 2- Výparník
- 3- Přihřívák
- 4- Dilatační kompenzátory
- 5- Vstupní komora
- 6- Výstupní komora
- 7- Výstupní komora
- 8- Spojovací trubky Na
- 9- Spojovací trubky Na

8.7. Parogenerátor PGN-272 jaderné elektrárny BN 800

Tento typ parního generátoru je také řazen do sekcí. Každá ze sekcí má dva moduly. Modul výparníku s ekonomizérem a modul přehříváku. Stejně jako u předchozího parního generátoru jsou moduly tvořeny plášťovými trubkami s distančními kompenzátory, v níž jsou uloženy svazky trubek s přímými trubkami přivařené k trubkovnicím ve spodní a horní části.

Parametr:	Velikost:
Pára-voda:	
Teplota generované páry	490°C
Tlak generované páry	14 MPa
Sodík:	
Teplota na vstupu do jednotlivé sekce	505°C
Teplota na výstupu z jednotlivé sekce	310°C
Tepelný výkon jednotlivé sekce	70 MW
Počet sekcí v jedné smyčce	10
Celkový výkon PG ve smyčce	700 MW

Tab. 8.2. Technické parametry Parogenerátoru PGN-272M



Obr. 8.7. Parogenerátor PGN-272

Popis:

- 1- Modul výparníku
s ekonomizérem
- 2- Modul přehříváku

9. Výpočet:

Abych mohl provést návrh a výpočet, je potřeba znát přesnou konstrukci výměníku. Je nutné zvolit typ výměníku, který je technicky zvládnutý a jeho užívání je ekonomicky výhodné.

Pro výpočty a návrh jsem zvolil koncepční řešení parního generátoru pro reaktor BOR 60, ze kterého budou výpočty vycházet.

Zadané hodnoty:

Výkon parního generátoru: 500MW

Chladicí médium voda-pára

Tlak vstupní páry: $p=15,0 \text{ MPa}$

Teplota vstupní páry: $t_p=520 \text{ °C}$

Teplota napájecí vody: $t_{nv}=260 \text{ °C}$

Chlazené médium

Teplota sodíku na vstupu: $t_{vst}=545 \text{ °C}$

Teplota sodíku na výstupu: $t_{výst}=370 \text{ °C}$

- Teplota ve výparníku

Tlak sytosti páry odpovídá tlaku: $p_{vyp}=15,2 \text{ MPa}$

Teplota ve výparníku: $t_{vyp}=343,2 \text{ °C}$

- Teplota za ekonomizérem

Určení teplotního rozdílu mezi teplotou sytosti páry ve výparníku a teploty vody vystupující z ekonomizéru:

$$\Delta t_{vyp/eko} = -5 \text{ °C}$$

$$T_{EKO} = t_{vyp} + \Delta t_{vyp/eko} = 343,2 + (-5) = 338,2 \text{ °C} \quad (9.1.)$$

- Entalpie vody a vodní páry ve známých bodech

Entalpie výstupní páry $i_{vys} = 3367,79 \text{ kJ/kg}$ (určeno z tabulek)

Entalpie napájecí vody $i_{nv} = 1134,83 \text{ kJ/kg}$ (určeno z tabulek)

Entalpie vody za ekem $i_{EKO} = 1574,58 \text{ kJ/kg}$ (určeno z tabulek)

- **Entalpie za výparníkem**

Volím entalpický spád na přehřívák:

$$\Delta i = 450 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{\text{vyp}} = 2917,79 \text{ kJ/kg (učeno z tabulek)}$$

- **Entalpie sodíku ve známých bodech**

$$\text{Entalpie výstupní sodíku} \quad i_{\text{vys}} = 441,55 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Entalpie vstupního sodíku} \quad i_{\text{vst}} = 206,72 \text{ kJ/kg}$$

Volím teplotní spád na: - přehříváku = 54 °C

- výparníku = 60 °C

- ekonomizéru = 61 °C

entalpie za: - ekonomizérem = 288,99 kJ/kg

- výparníkem = 369,87 kJ/kg

9.1. Bilance hmotnostních toků

9.1.1. Bilance na straně páry

$$m_{H_2O} = \frac{Q_v}{(i_{\text{výst}}^{520} - i_{\text{vst}}^{260}) \cdot 1000} = \frac{508 \cdot 10^6}{(3367,79 - 1134,83) \cdot 1000} = 227,5 \text{ kg/s} \quad (9.1.1)$$

9.1.2. Bilance na straně sodíku

$$m_{\text{Na}} = \frac{Q_v}{(i_{\text{Na}}^{545} - i_{\text{Na}}^{370}) \cdot 1000} = \frac{508 \cdot 10^6}{(441,5465 - 206,7172) \cdot 1000} = 2163,3 \text{ kg/s} \quad (9.1.2)$$

9.2. Tepelný tok na straně páry

9.2.1. Tepelný tok v přehříváku na straně páry

$$Q_{\text{PI}} = M_{\text{PI}} \cdot (i_{\text{PI}} - i_{\text{PI-vst}}) = 227,5 \cdot (3367,79 - 2917,79) = 102\,375 \text{ kJ/s} \quad (9.2.1)$$

9.2.2. Tepelný tok ve výparníku na straně páry

$$Q_{\text{VYP}} = M_{\text{PI}} \cdot (i_{\text{PI-vst}} - i_{\text{EKO}}) = 227,5 \cdot (2917,79 - 1574,58) = 305\,580,27 \text{ kJ/s} \quad (9.2.2)$$

9.2.3. Tepelný tok v ekonomizéru na straně páry

$$Q_{\text{EKO}} = M_{\text{PI}} \cdot (i_{\text{EKO}} - i_{\text{nv}}) = 227,5 \cdot (1574,58 - 1134,83) = 100\,043,12 \text{ kJ/s} \quad (9.2.3)$$

9.3. Tepelný tok na straně sodíku

9.3.1. Tepelný tok v přehříváku na straně sodíku

$$Q_{\text{PI}} = M_{\text{PI}} \cdot (i_{\text{PI}} - i_{\text{PI-vst}}) = 2163,3 \cdot (441,55 - 369,87) = 155\,065,34 \text{ kJ/s} \quad (9.3.1)$$

9.3.2. Tepelný tok ve výparníku na straně sodíku

$$Q_{\text{VYP}} = M_{\text{PI}} \cdot (i_{\text{PI-vst}} - i_{\text{EKO}}) = 2163,3 \cdot (369,87 - 288,99) = 175\,162,4 \text{ kJ/s} \quad (9.3.2)$$

9.3.3. Tepelný tok v ekonomizéru na straně sodíku

$$Q_{\text{EKO}} = M_{\text{PI}} \cdot (i_{\text{EKO}} - i_{\text{nv}}) = 2163,3 \cdot (288,99 - 206,72) = 177\,974,69 \text{ kJ/s} \quad (9.3.3)$$

9.4. Výpočet součinitele přestupu tepla – sodík

9.4.1. Ekonomizér

Parametry trubek sodíku

materiál:	ocel 15 418
počet trubek trubek:	$n_{trubek} = 90$ ks
vnitřní průměr trubky:	$d_1 = 0,012$ m
vnější průměr trubky:	$d_2 = 0,018$ m
tepelná vodivost:	$\lambda_{oceli} = 38$ W/mK

- Stanovení plochy pro průtok sodíku

$$S_{Na} = n_{trubek} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \right) = 90 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0,012^2 \right) = \quad (9.4.1.1)$$

$$S_{Na} = 0,010179 \text{ m}^2$$

- Stanovení střední teploty

Stanovuje se zde střední teplota z teplot na vstupu a výstupu sodíku z ekonomizéru.

$$t_1 = 431 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 370 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{stř} = \frac{(t_1 + 273,15) + (t_2 + 273,15)}{2} = 400,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.4.1.2)$$

Vlastnosti pro střední teplotu 401 °C a tlak 0,5 Mpa

hustota:	$\rho_{Na}^{stř} = 854$ kg/m ³
dynamická viskozita:	$\eta_{Na}^{stř} = -$ Pa·s
tepelná vodivost:	$\lambda_{Na}^{stř} = 68,7$ W/m·K
prandtlovo číslo:	$Pr_{Na}^{stř} = 0,52$ -
kinematická viskozita:	$\nu_{Na}^{stř} = 3,3 \cdot 10^{-7}$ m ² ·s

- Výpočet hmotnostního toku jedním článkem

$$m_{Na} = 2163,3 \text{ kg/s}$$

$$n_{článků} = 40 \text{ ks}$$

$$m_{Na}^{článků} = \frac{m_{Na}}{n_{článků}} = \frac{2163,3}{40} = 54,0825 \text{ kg/s} \quad (9.4.1.3)$$

- **Střední rychlost sodíku v článku**

$$w_{Na} = \frac{m_{Na}^{\text{článek}}}{\rho_{Na}^{\text{stř}} \cdot S_{Na}} = \frac{54,0825}{854 \cdot 0,010179} = 6,2215 \text{ m/s} \quad (9.4.1.4)$$

- **Reynoldsovo číslo v článku**

$$Re_{Na} = \frac{w_{Na} \cdot d_1}{v_{Na}^{\text{stř}}} = \frac{6,2215 \cdot 0,012}{3,3 \cdot 10^{-7}} = 226\,236 \quad (9.4.1.5)$$

$Re > 3500 \rightarrow \text{turbolentní proudění}$

- **Určení nusseltova čísla v článku**

$$Pe_{Na} = Re_{Na} \cdot Pr_{Na}^{\text{stř}} = 226\,236 \cdot 0,52 = 117\,642,72 \quad (9.4.1.6)$$

$$Nu_{Na} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe_{Na}^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 117\,642,72^{0,8} = 289 \quad (9.4.1.7)$$

- **Součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{Na} = \frac{Nu_{Na} \cdot \lambda_{Na}^{\text{stř}}}{d_1} = \frac{289 \cdot 68,7}{0,012} = 1\,654\,525 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.4.1.8)$$

9.4.2. Výparník

Parametry trubek sodíku

materiál:	ocel 15 418
počet trubek trubek	$n_{trubek} = 70$ ks
vnitřní průměr trubky	$d_1 = 0,012$ m
vnější průměr trubky	$d_2 = 0,018$ m
tepelná vodivost	$\lambda_{oceli} = 38$ W/mK

- Stanovení plochy pro průtok sodíku

Stanovuje se zde střední teplota z teplot na vstupu a výstupu sodíku z ekonomizéru.

$$S_{Na} = n_{trubek} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \right) = 70 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0,012^2 \right) \quad (9.4.2.1)$$

$$S_{Na} = 0,007917 \text{ m}^2$$

- Stanovení střední teploty

$$t_1 = 491 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 431 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{stř} = \frac{(t_1 + 273,15) + (t_2 + 273,15)}{2} = 734,3 \text{ K} = 461 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.4.2.2)$$

Vlastnosti pro střední teplotu 461 °C a tlak 0,5 Mpa

hustota:	$\rho_{Na}^{stř} = 839,56$ kg/m ³
dynamická viskozita:	$\eta_{Na}^{stř} =$ - Pa·s
tepelná vodivost:	$\lambda_{Na}^{stř} = 65,67$ W/m·K
prandtlovo číslo:	$Pr_{Na}^{stř} = 0,004963$ -
kinematická viskozita:	$\nu_{Na}^{stř} = 3,04 \cdot 10^{-7}$ m ² ·s

- Výpočet hmotnostního toku jedním článkem

$$m_{Na} = 2163,3 \text{ kg/s}$$

$$n_{článků} = 32 \text{ ks}$$

$$m_{Na}^{\text{článků}} = \frac{m_{Na}}{n_{\text{článků}}} = \frac{2163,3}{32} = 67,603 \text{ kg/s} \quad (9.4.2.3)$$

- **Střední rychlost sodíku v článku**

$$w_{Na} = \frac{m_{Na}^{\text{článků}}}{\rho_{Na}^{\text{stř}} \cdot S_{Na}} = \frac{67,603}{839,56 \cdot 0,007917} = 10,171 \text{ m/s} \quad (9.4.2.4)$$

- **Reynoldsovo číslo v článku**

$$Re_{Na} = \frac{w_{Na} \cdot d_1}{v_{Na}^{\text{stř}}} = \frac{10,171 \cdot 0,012}{3,04 \cdot 10^{-7}} = 401\,487 \quad (9.4.2.5)$$

$$Re > 3500 \rightarrow \textit{turbolentní proudění}$$

- **Určení nusseltova čísla v článku**

$$Pe_{Na} = Re_{Na} \cdot Pr_{Na}^{\text{stř}} = 401\,487 \cdot 0,004963 = 1993 \quad (9.4.2.6)$$

$$Nu_{Na} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 1993^{0,8} = 15,2 \quad (9.4.2.7)$$

- **Součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{Na} = \frac{Nu_{Na} \cdot \lambda_{Na}^{\text{stř}}}{d_1} = \frac{15,2 \cdot 65,67}{0,012} = 83\,182 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.4.2.8)$$

9.4.3. Přehřívák

Parametry trubek sodíku

materiál:	ocel 15 418
počet trubek trubek	$n_{trubek} = 70$ ks
vnitřní průměr trubky	$d_1 = 0,011$ m
vnější průměr trubky	$d_2 = 0,018$ m
tepelná vodivost	$\lambda_{oceli} = 38$ W/mK

- Stanovení plochy pro průtok sodíku

Stanovuje se zde střední teplota z teplot na vstupu a výstupu sodíku z ekonomizéru.

$$S_{Na} = n_{trubek} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \right) = 70 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0,011^2 \right) \quad (9.4.3.1)$$

$$S_{Na} = 0,006649 \text{ m}^2$$

- Stanovení střední teploty

$$t_1 = 545 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 491 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{stř} = \frac{(t_1 + 273,15) + (t_2 + 273,15)}{2} = 791 \text{ K} = 518 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.4.3.2)$$

Vlastnosti pro střední teplotu 518 °C a tlak 0,5 Mpa

$$\text{hustota:} \quad \rho_{Na}^{stř} = 824,68 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{dynamická viskozita:} \quad \eta_{Na}^{stř} = - \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\text{tepelná vodivost:} \quad \lambda_{Na}^{stř} = 63,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\text{prandtlovo číslo:} \quad Pr_{Na}^{stř} = 0,004728 -$$

$$\text{kinematická viskozita:} \quad \nu_{Na}^{stř} = 2,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$$

Výpočet hmotnostního toku jedním článkem

$$m_{Na} = 2163,3 \text{ kg/s}$$

$$n_{článků} = 40 \text{ ks}$$

$$m_{Na}^{článků} = \frac{m_{Na}}{n_{článků}} = \frac{2163,3}{40} = 54,0825 \text{ kg/s} \quad (9.4.3.3)$$

- **Střední rychlost sodíku v článku**

$$w_{Na} = \frac{m_{Na}^{\text{článek}}}{\rho_{Na}^{\text{stř}} \cdot S_{Na}} = \frac{54,0825}{824,68 \cdot 0,006649} = 9,86321 \text{ m/s} \quad (9.4.3.4)$$

- **Reynoldsovo číslo v článku**

$$Re_{Na} = \frac{w_{Na} \cdot d_1}{v_{Na}^{\text{stř}}} = \frac{9,86321 \cdot 0,012}{2,83 \cdot 10^{-7}} = 384\,000 \quad (9.4.3.5)$$

$$Re > 3500 \rightarrow \text{turbolentní proudění}$$

- **Určení nusseltova čísla v článku**

$$Pe_{Na} = Re_{Na} \cdot Pr_{Na}^{\text{stř}} = 384\,000 \cdot 0,004728 = 1811 \quad (9.4.3.6)$$

$$Nu_{Na} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 1811^{0,8} = 14,4 \quad (9.4.3.7)$$

- **Součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{Na} = \frac{Nu_{Na} \cdot \lambda_{Na}^{\text{stř}}}{d_1} = \frac{14,4 \cdot 63,15}{0,011} = 82\,723 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.4.3.8)$$

9.5. Výpočet součinitele přestupu tepla – parní strana

9.5.1. Ekonomizér

Parametry trubek

materiál:	ocel 15 418
počet trubek trubek	$n_{trubek} = 90$ ks
vnitřní průměr trubky	$d_1 = 0,0265$ m
vnější průměr trubky	$d_2 = 0,0337$ m
tepelná vodivost	$\lambda_{oceli} = 38$ W/mK

- Stanovení plochy pro průtok páry

Stanovuje se zde střední teplota z teplot na vstupu a výstupu páry z ekonomizéru.

$$S_{H_2O} = n_{trubek} \cdot \left(\frac{\pi \cdot (d_{2pára}^2 - d_{1sodík}^2)}{4} \right) = 90 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (0,0337^2 - 0,0265^2)}{4} \right) = \quad (9.5.1.1)$$

$$S_{H_2O} = 0,020795 \text{ m}^2$$

- Stanovení střední teploty

$$t_1 = 342,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 260 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{stř} = \frac{(t_1 + 273,15) + (t_2 + 273,15)}{2} = 874,25 \text{ K} = 301,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.5.1.2)$$

Vlastnosti pro střední teplotu 301 °C a tlak 0,5 Mpa

hustota:	$\rho_{páry}^{stř} = 725$ kg/m ³
dynamická viskozita:	$\eta_{páry}^{stř} = 8,83 \cdot 10^{-5}$ Pa·s
tepelná vodivost:	$\lambda_{páry}^{stř} = 0,5587$ W/m·K
kinematická viskozita:	$\nu_{páry}^{stř} = 1,22 \cdot 10^{-7}$ m ² ·s
měrná tepelná kapacita:	$c_{p \text{ páry}}^{stř} = 5476$ J/kg·K

- **Prandtlovo číslo**

$$Pr_{páry}^{stř} = \frac{c_{p\ páry}^{stř} \cdot \eta_{páry}^{stř}}{\lambda_{páry}^{stř}} = \frac{5476 \cdot 8,83 \cdot 10^{-5}}{0,5587} = 0,865 \quad (9.5.1.3)$$

- **Výpočet hmotnostního toku jedním článkem**

$$m_{H_2O} = 227,5 \text{ kg/s}$$

$$n_{článků} = 40 \text{ ks}$$

$$m_{H_2O}^{článků} = \frac{m_{H_2O}}{n_{článků}} = \frac{227,5}{40} = 5,69 \text{ kg/s} \quad (9.5.1.4)$$

- **Střední rychlost páry v článku**

$$w_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}^{článků}}{\rho_{H_2O}^{stř} \cdot S_{H_2O}} = \frac{5,69}{725 \cdot 0,020795} = 0,37741 \text{ m/s} \quad (9.5.1.5)$$

- **Reynoldsovo číslo v článku**

$$Re_{H_2O} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_1}{v_{H_2O}^{stř}} = \frac{0,37741 \cdot 0,0265}{1,22 \cdot 10^{-7}} = 81\,978 \quad (9.5.1.6)$$

$$Re > 3500 \rightarrow \text{turbolentní proudění}$$

- **Určení nusseltova čísla v článku**

$$Pe_{Na} = Re_{H_2O} \cdot Pr_{H_2O}^{stř} = 81\,978 \cdot 0,865 = 70\,911 \quad (9.5.1.7)$$

$$Nu_{H_2O} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 70\,911^{0,8} = 194 \quad (9.5.1.8)$$

- **Součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{H_2O} = \frac{Nu_{H_2O} \cdot \lambda_{H_2O}^{stř}}{d_1} = \frac{194 \cdot 0,5587}{0,0265} = 4\,090 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.1.9)$$

- **Součinitel prostupu tepla v článku**

$$k_{článku} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O}} + \frac{\Delta s}{\lambda_{oceli}} + \frac{1}{\alpha_{Na}}} = \frac{1}{\frac{1}{4\,090} + \frac{0,0003}{38} + \frac{1}{1\,654\,525}} = 3953 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.1.10)$$

9.5.2. Výparník

Parametry trubek

materiál:	ocel 15 418
počet trubek trubek	$n_{trubek} = 70$ ks
vnitřní průměr trubky	$d_1 = 0,0265$ m
vnější průměr trubky	$d_2 = 0,0337$ m
tepelná vodivost	$\lambda_{oceli} = 38$ W/mK

- Stanovení plochy pro průtok páry

Stanovuje se zde střední teplota z teplot na vstupu a výstupu páry z ekonomizéru.

$$S_{H_2O} = n_{trubek} \cdot \left(\frac{\pi \cdot (d_{2pára}^2 - d_1^2)}{4} \right) = 70 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (0,0337^2 - 0,0265^2)}{4} \right) = \quad (9.5.2.1)$$

$$S_{H_2O} = 0,020795 \text{ m}^2$$

- Stanovení střední teploty

$$t_1 = 342,2 \text{ °C}$$

$$t_2 = 342,2 \text{ °C}$$

$$t_{stř} = \frac{(t_1 + 273,15) + (t_2 + 273,15)}{2} = 615,35 \text{ K} = 342,2 \text{ °C} \quad (9.5.2.2)$$

Vlastnosti pro střední teplotu 342 °C a tlak 0,5 Mpa

hustota:	$\rho_{páry}^{stř} = 606 \text{ kg/m}^3$
----------	--

dynamická viskozita:	$\eta_{páry}^{stř} = 3,34 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
----------------------	--

tepelná vodivost:	$\lambda_{páry}^{stř} = 0,2353 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
-------------------	--

kinematická viskozita:	$\nu_{páry}^{stř} = 1,15 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}$
------------------------	--

měrná tepelná kapacita:	$c_{p \text{ páry}}^{stř} = 7935 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
-------------------------	---

- Prandtlovo číslo

$$Pr_{páry}^{stř} = \frac{c_{p \text{ páry}}^{stř} \cdot \eta_{páry}^{stř}}{\lambda_{páry}^{stř}} = \frac{5476 \cdot 8,83 \cdot 10^{-5}}{0,5587} = 1,13 \quad (9.5.2.3)$$

- **Výpočet hmotnostního toku jedním článkem**

$$m_{H_2O} = 227,5 \text{ kg/s}$$

$$n_{\text{článků}} = 32 \text{ ks}$$

$$m_{H_2O}^{\text{článků}} = \frac{m_{H_2O}}{n_{\text{článků}}} = \frac{227,5}{32} = 7,11 \text{ kg/s} \quad (9.5.2.4)$$

- **Střední rychlost páry v článku**

$$w_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}^{\text{článků}}}{\rho_{H_2O}^{\text{stř}} \cdot S_{H_2O}} = \frac{7,11}{606 \cdot 0,020795} = 0,56421 \text{ m/s} \quad (9.5.2.5)$$

- **Reynoldsovo číslo v článku**

$$Re_{H_2O} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_1}{v_{H_2O}^{\text{stř}}} = \frac{0,56421 \cdot 0,0265}{1,15 \cdot 10^{-7}} = 130\,014 \quad (9.5.2.6)$$

$$Re > 3500 \rightarrow \text{turbolentní proudění}$$

- **Určení nusseltova čísla v článku**

$$Pe_{H_2O} = Re_{H_2O} \cdot Pr_{H_2O}^{\text{stř}} = 130\,014 \cdot 1,13 = 146\,916 \quad (9.5.2.7)$$

$$Nu_{H_2O} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 146\,916^{0,8} = 344,39 \quad (9.5.2.8)$$

- **Součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{H_2O} = \frac{Nu_{H_2O} \cdot \lambda_{H_2O}^{\text{stř}}}{d_1} = \frac{344,39 \cdot 0,2353}{0,0265} = 3057,9 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.2.9)$$

- **Součinitel prostupu tepla v článku**

$$k_{\text{článku}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O}} + \frac{\Delta s}{\lambda_{oceli}} + \frac{1}{\alpha_{Na}}} = \frac{1}{\frac{1}{3057,9} + \frac{0,0003}{38} + \frac{1}{83\,182}} = 2882 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.2.10)$$

9.5.3. Přehřívák

Parametry trubek

materiál:	ocel 15 418
počet trubek trubek	$n_{trubek} = 70$ ks
vnitřní průměr trubky	$d_1 = 0,0265$ m
vnější průměr trubky	$d_2 = 0,0337$ m
tepelná vodivost	$\lambda_{oceli} = 38$ W/mK

- Stanovení plochy pro průtok páry

Stanovuje se zde střední teplota z teplot na vstupu a výstupu páry z ekonomizéru.

$$S_{H_2O} = n_{trubek} \cdot \left(\frac{\pi \cdot (d_{2pára}^2 - d_1^2)}{4} \right) = 70 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (0,0337^2 - 0,0265^2)}{4} \right) = \quad (9.5.3.1)$$

$$S_{H_2O} = 0,020795 \text{ m}^2$$

- Stanovení střední teploty

$$t_1 = 520 \text{ °C}$$

$$t_2 = 342,2 \text{ °C}$$

$$t_{stř} = \frac{(t_1 + 273,15) + (t_2 + 273,15)}{2} = 704,25 \text{ K} = 431,1 \text{ °C} \quad (9.5.3.2)$$

Vlastnosti pro střední teplotu 431 °C a tlak 0,5 Mpa

$$\text{hustota:} \quad \rho_{páry}^{stř} = 57 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{dynamická viskozita:} \quad \eta_{páry}^{stř} = 2,63 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\text{tepelná vodivost:} \quad \lambda_{páry}^{stř} = 0,0783 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\text{kinematická viskozita:} \quad \nu_{páry}^{stř} = 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}$$

$$\text{měrná tepelná kapacita:} \quad c_{p \text{ páry}}^{stř} = 3519 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

- Prandtlovo číslo

$$Pr_{páry}^{stř} = \frac{c_{p \text{ páry}}^{stř} \cdot \eta_{páry}^{stř}}{\lambda_{páry}^{stř}} = \frac{3519 \cdot 2,63 \cdot 10^{-5}}{0,0783} = 1,18 \quad (9.5.3.3)$$

- **Výpočet hmotnostního toku jedním článkem**

$$m_{H_2O} = 227,5 \text{ kg/s}$$

$$n_{\text{článků}} = 40 \text{ ks}$$

$$m_{H_2O}^{\text{článků}} = \frac{m_{H_2O}}{n_{\text{článků}}} = \frac{227,5}{40} = 5,69 \text{ kg/s} \quad (9.5.3.4)$$

- **Střední rychlost páry v článku**

$$w_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}^{\text{článků}}}{\rho_{H_2O}^{\text{stř}} \cdot S_{H_2O}} = \frac{5,69}{57 \cdot 0,020795} = 44,8004 \text{ m/s} \quad (9.5.3.5)$$

- **Reynoldsovo číslo v článku**

$$Re_{H_2O} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_1}{v_{H_2O}^{\text{stř}}} = \frac{44,8004 \cdot 0,0265}{4,6 \cdot 10^{-7}} = 276\,545 \quad (9.5.3.6)$$

$$Re > 3500 \rightarrow \text{turbolentní proudění}$$

- **Určení nusseltova čísla v článku**

$$Pe_{H_2O} = Re_{H_2O} \cdot Pr_{H_2O}^{\text{stř}} = 276\,545 \cdot 1,18 = 326\,323 \quad (9.5.3.7)$$

$$Nu_{H_2O} = 4,3 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} = 4,3 + 0,025 \cdot 326\,323^{0,8} = 648,3 \quad (9.5.3.8)$$

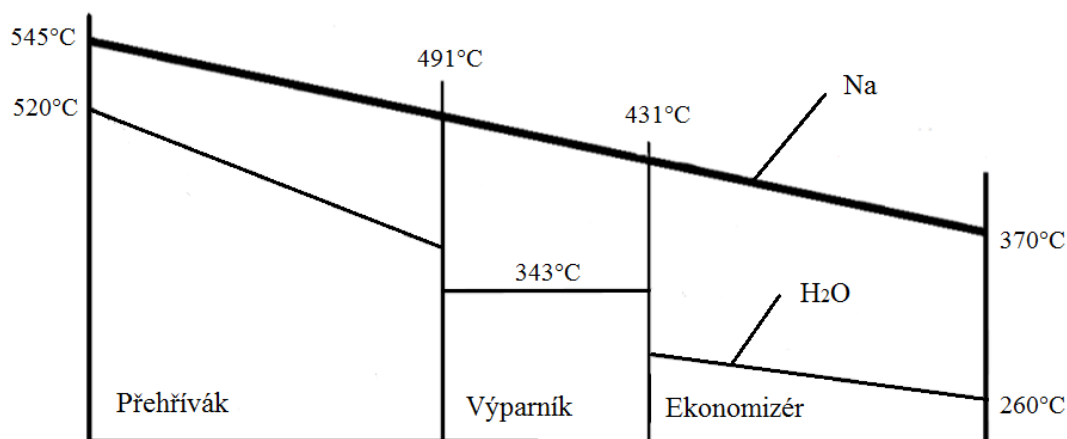
- **Součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{H_2O} = \frac{Nu_{H_2O} \cdot \lambda_{H_2O}^{\text{stř}}}{d_1} = \frac{648,3 \cdot 0,0783}{0,0265} = 1915,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.3.9)$$

- **Součinitel prostupu tepla v článku**

$$k_{\text{článku}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H_2O}} + \frac{\Delta s}{\lambda_{\text{oceli}}} + \frac{1}{\alpha_{Na}}} = \frac{1}{\frac{1}{1915,5} + \frac{0,0003}{38} + \frac{1}{82\,723}} = 1845 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.3.10)$$

10. Výpočet délky článku



Obr. 10.1. Teplotní schéma parogenerátoru

10.1. Ekonomizér

- **Střední logaritmický spád**

$$\overline{\Delta T_{ln}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{110 - 88}{\ln\left(\frac{110}{88}\right)} = 98,6 \text{ K} \quad (10.1.1)$$

- **Celková plocha trubek**

$$S_{celk} = \pi \cdot d_2 \cdot l_{\text{čládku}} \cdot n_{trubek} \cdot n_{\text{čládků}} \quad (10.1.2)$$

- **Celková plocha trubek určená z potřebného výkonu**

$$S_{celk} = \frac{\dot{Q}}{q} = \frac{\dot{Q}}{\overline{\Delta T_{ln}} \cdot k_{\text{čládku}}} \quad (10.1.2)$$

Dosazením rovnic (10.1.2) a (10.1.2) do sebe:

$$\frac{\dot{Q}}{\overline{\Delta T_{ln}} \cdot k_{\text{čládku}}} = \pi \cdot d_2 \cdot l_{\text{čládku}} \cdot n_{trubek} \cdot n_{\text{čládků}} \quad (10.1.4)$$

- **Vyjádření a výpočet délky článku:**

$$l_{\text{čládku}} = \frac{\dot{Q}}{\overline{\Delta T_{ln}} \cdot k_{\text{čládku}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot n_{trubek} \cdot n_{\text{čládků}}} = \quad (10.1.5)$$

$$l_{\text{čládku}} = \frac{5 \cdot 10^8}{98,6 \cdot 3953 \cdot \pi \cdot 0,0337 \cdot 90 \cdot 40} = 3,3657 \text{ m}$$

10.2. Výparník

- **Střední logaritmický spád**

$$\overline{\Delta T_{ln}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{148 - 88}{\ln\left(\frac{148}{88}\right)} = 115,4 \text{ K} \quad (10.2.1)$$

- **Vyjádření a výpočet délky článku:**

Z původních rovnic (10.1.2) a (10.1.2)

$$l_{\text{článku}} = \frac{\dot{Q}}{\overline{\Delta T_{ln}} \cdot k_{\text{článku}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot n_{\text{trubek}} \cdot n_{\text{článků}}} = \quad (10.2.2)$$

$$l_{\text{článku}} = \frac{5 \cdot 10^8}{115,4 \cdot 2882 \cdot \pi \cdot 0,0337 \cdot 70 \cdot 32} = 6,339 \text{ m}$$

10.3. Přehřívák

- **Střední logaritmický spád**

$$\overline{\Delta T_{ln}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{148 - 25}{\ln\left(\frac{148}{25}\right)} = 69,2 \text{ K} \quad (10.3.1)$$

- **Vyjádření a výpočet délky článku:**

Z původních rovnic (10.1.2) a (10.1.2)

$$l_{\text{článku}} = \frac{\dot{Q}}{\overline{\Delta T_{ln}} \cdot k_{\text{článku}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot n_{\text{trubek}} \cdot n_{\text{článků}}} = \quad (10.3.5)$$

$$l_{\text{článku}} = \frac{5 \cdot 10^8}{69,2 \cdot 1845 \cdot \pi \cdot 0,0337 \cdot 70 \cdot 40} = 13,211 \text{ m}$$

Závěr:

Cílem této práce dle zadání bylo podat ucelené shrnutí ohledně tématu parních generátorů jaderné elektrárny s rychlým reaktorem, dále také uvést jaké vlastnosti a vlivy mají chemické reakce sodíku a oxidu uhličitého a reakce sodíku a vody. Poslední částí této práce je zjednodušený výpočet koncepce tepelného výměníku.

V první části byly rozebrány možné druhy rychlých reaktorů IV. generace podle druhu chlazení, ale pro zpracování v další části bakalářské práce byla vybrána pouze varianta sodíkem chlazených rychlých reaktorů.

Další kapitola je už zaměřena na parní generátory, parní generátory chlazené tekutými kovy. Obsahuje i popis nejpoužívanějších tekutých kovů u parních generátorů používaných u těchto reaktorů, ale hlavně detailnější popis sodíku a jeho slitin jako látky pro vybranou koncepci parního generátoru pro tuto práci. Obsahuje i podkapitulu, ve které se taky píše o chování ocelí ve styku se sodíkem.

Práce taky obsahuje kapitolu zabývající se základní bezpečnostní systém parogenerátorů se sodíkem. Tato kapitola navazuje na předešlou kapitolu, kde jsou uvedeny chemické reakce sodíku a oxidu uhličitého a reakce sodíku a vody. Z této kapitoly vyplývá, že tyto reakce jsou velmi bouřlivé, při kterých je uvolňováno teplo. Proto je nutno zavádět bezpečnostní systémy.

Poslední dvě kapitoly teoretické části se zabývají čistě parními generátory s rychlými reaktory chlazenými sodíkem. V té první se uvádějí typy konstrukčních řešení parních generátorů s tekutým sodíkem, kde jsou uvedeny a popsány různé typy konstrukčních řešení parních generátorů. V té druhé části jsou příklady parních generátorů u elektráren chlazených sodíkem, které v minulosti byly použity v reálných případech a některé z nich jsou funkční dodnes.

Poslední kapitola je výpočtová, kde se počítá zjednodušený výpočet koncepce tepelného výměníku. Návrh zjednodušeného tepelného výměníku vychází z koncepčního řešení parního generátoru pro reaktor BOR 60. Jsou zde stanoveny hmotnostní a tepelné toky a výpočet součinitele přestupu tepla v jednotlivých částech parního generátoru. Jsou počítány pro ekonomizér, výparník a přehřívák. Dále jsou zde pro tyto části stanoveny délky článků.

Seznam použitých pramenu:

- [1] HEJZLAR, Radko: *Stroje a zařízení jaderných elektráren – Díl 1*, ČVUT Praha, vydání třetí, 2005
- [2] HEJZLAR, Radko: *Stroje a zařízení jaderných elektráren – Díl 2*, ČVUT Praha, vydání třetí, 2005
- [3] KUCHAR, Lumír – HABRMAN Petr: *Základy jaderné energetiky a bezpečnosti*, VŠB v Ostravě, 1988
- [4] MÁTAL, Oldřich: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*, Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001
- [5] HEZOUČKÝ, František: *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005, ISBN 80-01-03324-4
- [6] NERUD, Pavel: *Jaderná energetika v pracích mladé generace – Parní generátory pro jaderné elektrárny se sodíkem chlazenými reaktory*, Nakladatelství Český svaz vědeckotechnických společností v Praze, 2009
- [7] HEŘMANSKÝ, Bedřich: *Jaderné energetické reaktory*, Československá komise pro atomovou energii, Praha, 1988
- [8] KOLAT, Pavel: *Přenos tepla a hmoty*, VŠB Ostrava, 2001, třetí vydání
- [9] <http://www.energyweb.cz>
- [10] <http://www.vutbr.cz>
- [11] <http://www.cez.cz>